



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402214

引用格式:陈俞钱,刘龙斌,谢亚红,等.大功率离子源120 keV缝型加速器束流光学分析[J].科学技术与工程,2025,25(6):2364-2370.

Chen Yuqian, Liu Longbin, Xie Yahong, et al. Beam optical analysis of the 120 keV slit accelerator for high-power ion source[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2364-2370.

原子能技术

大功率离子源 120 keV 缝型加速器束流光学分析

陈俞钱^{1,2}, 刘龙斌^{1,2}, 谢亚红^{3*}, 杨立鑫^{1,2}, 胡纯栋³

(1. 东华理工大学核科学与工程学院, 南昌 330013; 2. 江西省核辐射探测及应用工程技术研究中心, 南昌 330013;
3. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要 为进一步满足实验先进超导托卡马克装置(experimental advanced superconducting Tokamak, EAST)对等离子体加热的需求,中性束注入(neutral beam injection, NBI)系统需要更高的束功率。为此, EAST NBI 研究室开展了 120 keV 束能量的加速器研制工作。整个加速器的分析研究需要从束流光学、绝缘支撑、主动冷却和材料等多个角度进行。从等离子体参数、静电透镜、电极间耐压以及装配误差等方面考虑,利用数值模拟程序对 120 keV 缝型四电极加速器中的束流轨迹、电场强度分布和束散角等束流光学相关参数进行了研究和优化,初步确定了新加速器的电极参数。该加速器在 1.52 μp 的导流系数下,垂直方向的最小束散角为 0.6°,满足离子源氘离子束流强度为 60 A 和发散角小于 1°的设计要求。

关键词 中性束注入; 加速器; 导流系数; 束散角

中图分类号 TL58; 文献标志码 A

Beam Optical Analysis of the 120 keV Slit Accelerator for High-power Ion Source

CHEN Yu-qian^{1,2}, LIU Long-bin^{1,2}, XIE Ya-hong^{3*}, YANG Li-xin^{1,2}, HU Chun-dong³

(1. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Engineering Technology Research Center of Nuclear Radiation Detection and Application, Nanchang 330013, China;
3. Institute of Plasma Physics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

[Abstract] To further meet the plasma heating requirements of EAST (experimental advanced superconducting tokamak) device, NBI (neutral beam injection) system requires higher beam power. Accordingly, the EAST NBI laboratory has developed a 120 keV accelerator for this purpose. The analysis of the whole accelerator needs to be carried out from various perspectives such as beam optics, insulation support, active cooling and materials. Taking into account factors such as plasma parameters, electrostatic lens, voltage resistance between grids, and assembly errors, the numerical simulation program was utilized to beam optics analysis for the slit tetrode ion source accelerator. Beam trajectory, electric field strength distribution, and beam divergence angle were investigated and optimized to preliminarily determine the grid parameters of the new multi-slit accelerator. The accelerator obtains the beam with the minimum divergence angle of 0.6° in the vertical direction with perveance of 1.52 μp , meeting the design criteria for beam current intensity of 60 A and divergence angle below 1° of the ion source.

[Keywords] neutral beam injection; accelerator; perveance; beam divergence angle

磁约束核聚变能源作为人类重要的能源布局,实现商业运行面临许多难题^[1-2],等离子体加热是其中一项关键挑战。由于中性束注入(neutral beam injection, NBI)加热技术拥有加热效率最高,物理机制明确等优点,因此在磁约束核聚变研究中得到了

广泛应用^[3-4]。

中性束注入加热设备首先通过离子源产生高能离子束,而托卡马克内存在强大的磁场导致离子束无法进入等离子体内部。因此,离子束需要与中性化室中的背景气体发生碰撞形成高能中性粒子

收稿日期: 2024-03-28; 修订日期: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(11975261)

第一作者: 陈俞钱(1987—),男,汉族,安徽枞阳人,博士,讲师。研究方向:强流离子源长脉冲放电运行。E-mail: yqfrdd@ecut.edu.cn。

*通信作者: 谢亚红(1982—),男,汉族,安徽合肥人,博士,研究员。研究方向:大功率离子源物理和实验。E-mail: xieyh@ipp.ac.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

束, 最终将能量传递给等离子体。整个过程由束源、束线、电源、真空、控制和诊断等多个系统共同完成。随着托卡马克装置不断发展, 对 NBI 的注入能量也提出了更高的要求。强流离子源作为 NBI 的核心设备决定了等离子体的加热能力, 中外已有大量关于中性束强流正离子源的研究成果和经验, 例如, 美国普林斯顿大学等离子体物理实验室 (princeton plasma physics laboratory, PPPL) 的托卡马克聚变试验反应堆 (Tokamak fusion test reactor, TFTR) 装置和欧洲联合环 (joint european torus, JET) 装置等 NBI 系统均已配备束能量大于 100 keV 的离子源^[5-6]。核工业西南物理研究院 HL-2M 装置的 NBI 加热系统规划了三条束线, 其中第一条和第二条均已配备了 4 套 80 kV/45 A 的正离子源^[7]。EAST 装置目前安装了两条设计参数基本相同的 NBI 束线: NBI-1 和 NBI-2 分别在 2014 年和 2015 年投入使用。每条束线安装了两个 80 kV/50 A 的大功率正离子源^[8-10]。中性束离子源的稳定运行离不开良好的加速器光学性能, 特别是导流系数与等离子体参数的匹配和小的束散角^[11-12]。所以, 必须根据离子源所需的光学性能计算出加速器的设计参数。由于离子源的制造和安装成本, 实验往往用于验证结果, 而模拟计算已成为加速器参数优化的主要手段之一。为提升美国 DIII-D 装置中性束离子源的束能量至 105 keV, Crowley 等^[13]利用非线性光学程序 IGUN 计算了调整电极间隙后的三电极和四电极加速器的束流引出特性, 发现了在最佳导流系数相同的参数下四电极加速器能够获得更小的束散角, 而三电极加速器的电极间电场强度更小, 有更小的打火概率。Kim 等^[14-15]通过 IGUN 和线性光学理论优化并确定了韩国超导托卡马克 (Korea superconducting tokamak advanced research, KSTAR) 中性束离子源 100 keV 加速器的设计参数, 还对不同的等离子体电极厚度进行了模拟计算, 发现减

小等离子体厚度可以有效提升加速器的导流系数, 同时保持较小的束散角。Xie 等^[9]分析了 EAST NBI 80 keV 缝型加速器的光学性能, 对比了圆形和菱形等离子体电极对加速器引出能力和束散角的影响。

离子源加速器决定着束流能量的上限和轨迹。随着束能量的提升, 电极和束线将承受更高的热负载。而减小束散角不仅可以降低设备的热负载, 还能有效提高束传输效率, 减小打火概率。在给定束能量的设计目标下, 可通过束流光学分析方法来约束束离子的横向运动^[16]。具体而言, 通过调整电极的电压、孔径大小、间隙和几何形状等参数, 实现加速器高压与等离子体发生器放电参数匹配、束流的会聚及发散 (静电透镜) 和偏转, 从而最终减小发散角。

本文研究通过数值模拟评估 120 keV 缝型加速器的离子光学性能, 并给出电极修改前后的参数, 研究成果将进一步推进 EAST 装置的等离子体稳态运行, 同时也是对束能量 100 keV 以上中性束大功率正离子源的工程实践。

1 EAST NBI 缝型加速器结构

EAST NBI 离子源属于大面积高功率源, 分为放电室 (等离子体发生器) 和加速器两个部分, 图 1 是离子源和加速器的剖面。放电室采用热阴极桶式结构, 加速器采用多缝四电极结构, 引出区面积为 $10\text{ cm} \times 48\text{ cm}$, 透明度 (有效引出面积/引出面积) 达 60%, 共有 52 条引出缝, 防护罩盖住了边缘的两个引出缝, 所以加速器实际有 50 条缝。每块电极由 4 块子电极构成, 中间两块是水平的, 边缘两块相对轴心有 $1^\circ 5'$ 的倾斜角, 使束流在引出面长边的方向 (垂直方向) 呈聚焦状态, 短边的方向不聚焦。离子源加速器 4 个电极分别是等离子体电极 (plasma grid, PG)、梯度电极 (gradient grid, GG)、抑制电极

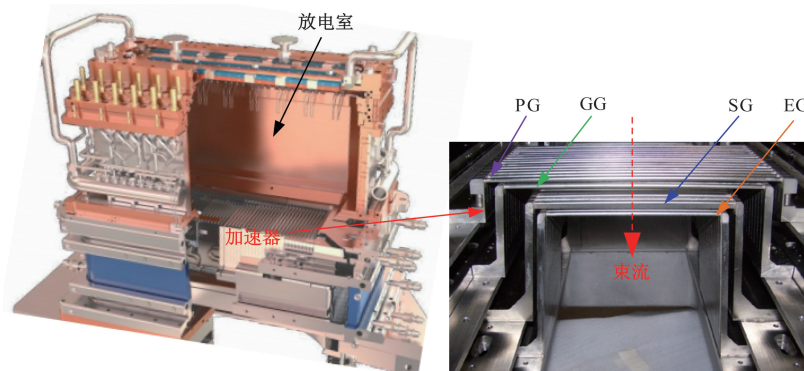


图 1 EAST NBI 离子源和加速器剖面图

Fig. 1 Profile of the EAST NBI ion source and accelerator

(suppression grid, SG)和地电极(earth grid, EG),由PG与GG之间的电势差产生的电场将离子引出,GG与SG之间的电场将离子加速,而SG与EG之间的反向电场则为了抑制反向电子流避免反向电子轰击放电室。

2 引出束特性计算理论

表征引出束特性的参数主要是束流能量、束流强度和发散角,这3个参数与引出电极的结构和离子源等离子体的放电状态有着密不可分的关系。对于强流离子源加速器的物理设计,一般用导流系数(或引出离子电流密度)、发散角和束流能量来表示。导流系数是衡量离子源加速器引出能力的参数,它取决于离子源加速器电极间隙和形状^[17]。定义式为

$$P = \frac{I}{V^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

式(1)中: I 为总束流的大小; V 为总电压的大小。

由于空间电荷限制,两平面二极管之间引出的束电流存在最大值,可以得出该值下的导流系数计算公式为

$$P_0 = \frac{4}{9} \pi \frac{a_1^2}{d_1^2} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2\xi e}{M}} \quad (2)$$

式(2)中: a_1 和 d_1 为等离子体电极的缝半间隙和第一间隙的大小; ε_0 为真空环境下的介电常数; ξ 为离子所带电荷数; M 为离子质量数; e 为单位电荷。

根据膜孔透镜和线性光学理论可以得出发散角 θ 的估算公式^[18-19]为

$$\theta = 0.62S \left[\frac{P}{p_0} - 0.4 \frac{a_2}{a_1} \frac{d_1 g^2}{d_2 (1-g)} + 0.53 \frac{a_2}{a_1} - 1 \right] + 0.31 \times S \frac{P}{P_0} \left[1 + \frac{t_1}{t_2} + \frac{0.35 a_1 (d_2 + d_3 + t_2 + t_3)}{a_2 d_1} \left(\frac{1-g}{1-0.5g} \right)^{1.5} \right] \quad (3)$$

式(3)中: $S = a_1/d_1$ 为横纵比; $g = V_{gg}/V$ 为梯度电极电压与等离子体电极电压之比。

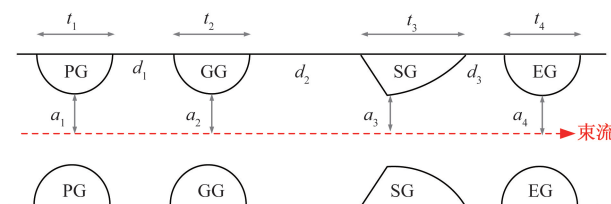
式(3)为静电透镜效应和引出离子空间电荷效应的线性和。可以得出 $|\theta|$ 随导流系数变化的函数图呈V字形,即存在一个最小发散角,该发散角对应的导流系数为最佳导流系数。

德国法兰克福大学的 R. Becker 源于电子轨迹模拟程序 SLAC 开发了 IGUN^[20-21],该程序基于等离子体鞘层自洽理论,可以计算正离子的空间电荷效应和轨迹。根据 EAST 对注入束散角和束流强度的要求,可利用非线性光学程序 IGUN 来设计离子源加速器电极的参数,更加精确地计算并调节束散角和束流强度。

3 分析结果

整个束流由若干个束元组成,通过对一个束元的研究可以反映整个束流系统^[22]。离子源加速器的缝型几何结构示意图如图2所示。80 keV和120 keV加速器的电极参数在表1中给出,其中第一间隙从2.34 mm扩大至3.5 mm,第二间隙由7.67 mm扩大至12 mm,第三间隙由1.73 mm扩大至1.75 mm,其他参数保持不变。

最佳参数的确定需要研究电极间隙和电压对束流光学的影响,其中PG和GG对束流性能的影响最大,所以对不同的第一间隙、第二间隙和电压比进行模拟计算,并做出引出特性曲线。对于强流离子源,要求加速器有极强的离子引出能力,而第一间隙的场强大小对加速器的离子引出能力影响最大,由图3(a)可知,通过减小第一间隙可以有效增大离子引出能力;但当束流处于“欠聚焦”状态时,第一间隙的场强过大会加剧束流的发散,因此,需要选择一个能同时满足离子引出能力和发散角的第一间隙值。当电压比为86%时,3.5 mm的第一间隙最佳。第二间隙的场强对加速器聚焦束流的能力影响最大。根据静电透镜理论可知,第二间隙



t_1, t_2, t_3 和 t_4 为各个电极的厚度; a_1, a_2, a_3 和 a_4 为各个电极缝半间隙; d_1, d_2 和 d_3 为电极之间的间隙

图2 离子源加速器缝型几何模型示意图

Fig. 2 Schematic of the multi-slit geometric model of the ion source accelerator

表1 加速器升级前后的几何模型参数

Table 1 Geometric model parameters before and after accelerator upgrade

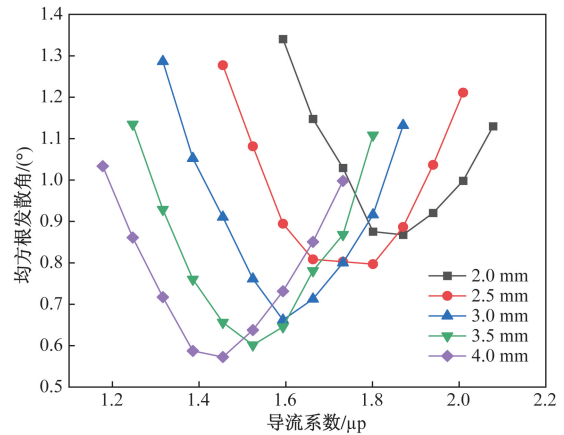
类别	电极名称	参数	80 keV	120 keV
电极缝半间隙	PG	a_1/mm	2.70	2.70
	GG	a_2/mm	2.90	2.90
	SG	a_3/mm	2.26	2.26
	EG	a_4/mm	2.90	2.90
电极厚度	PG	t_1/mm	3.60	3.60
	GG	t_2/mm	3.18	3.18
	SG	t_3/mm	5.99	5.99
	EG	t_4/mm	3.18	3.18
电极间隙	PG-GG	d_1/mm	2.34	3.50
	GG-SG	d_2/mm	7.67	12.00
	SG-EG	d_3/mm	1.73	1.75

的场强必须大于第一间隙的场强,GG 孔径才具有聚焦束流的效果。图 3(b) 给出了不同第二间隙 d_2 的计算结果,随着 d_2 的不断减小,最佳导流系数增大且发散角减小,这表明较小的 d_2 有利于产生优良光学品质的束流,而电极的耐压性能限制了第二间隙的距离,因此需要计算场强分布来设置最小第二间隙。根据图 4 中的电场强度分布计算结果,电压比为 86%,第二间隙为 12 mm 时,位置 10 和位置 11 处场强大小为 137 kV/cm 和 135 kV/cm,这是加速器能够维持的最大场强。

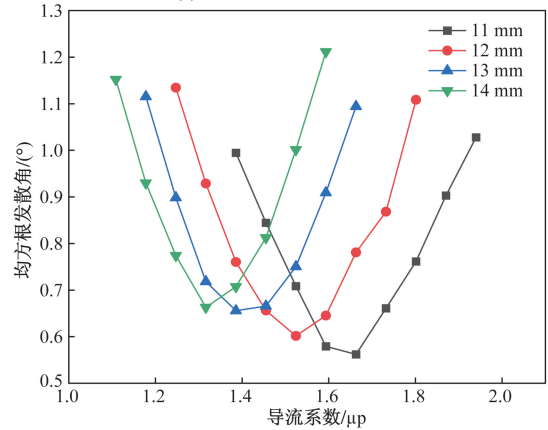
静电透镜的焦距由第一间隙、第二间隙和电压比 V_{gg}/V 共同决定,因此,还需要分析电压比对光学性能的影响。对不同电压比模型进行计算, V_{gg}/V 为 80% (96 kV)、82% (98.4 kV)、84% (100.8 kV) 和 86% (103.2 kV),且 SG 和 EG 的电压分别保持 -3.5 kV 和 0 V 不变,得到发散角随导流系数变化的曲线图,如图 5 所示。当电压比减小时,最佳导流系数和发散角的值不断增大。在电压比为 86% 时,可以观察到最小发散角为 0.6° ,对应的最佳导流系数和等离子体引出电流密度分别为 $1.52 \mu\text{p}$ 和 0.22 A/cm^2 。在束散角小于 1° 的设计要求下,最大引出电流密度可达 0.25 A/cm^2 。由于电极在装配过程中存在一定的装配误差范围,导致孔径大小会发生变化,其中 PG 和 GG 的装配误差对束流的影响较大,因此分别计算了在最佳导流系数下 PG 和 GG 孔径在 0.2 mm 内变化的束散角,如图 6(a) 所示,PG 和 GG 装配误差导致束散角的变化分别在 0.05° 和 0.04° 以内,在可接受范围。

等离子体参数也对束流光学有一定影响,离子温度是比较关心的参数之一。对离子进行引出时,

离子存在一个初始横向动能,该动能的大小由离子温度决定。图 6(b) 给出了离子温度分别为 0 eV 和 5 eV 时的引出特性曲线,可以看出当离子温度是 0.5 eV 时最小束散角明显更高。为了更直观地展示 120 keV 加速电压与离子密度匹配的重要性,图 7



(a) 第一间隙对束流光学的影响结果



(b) 第二间隙对束流光学的影响结果

图 3 间隙大小对束流光学的影响结果

Fig. 3 Results on the effect of gap size on beam optics

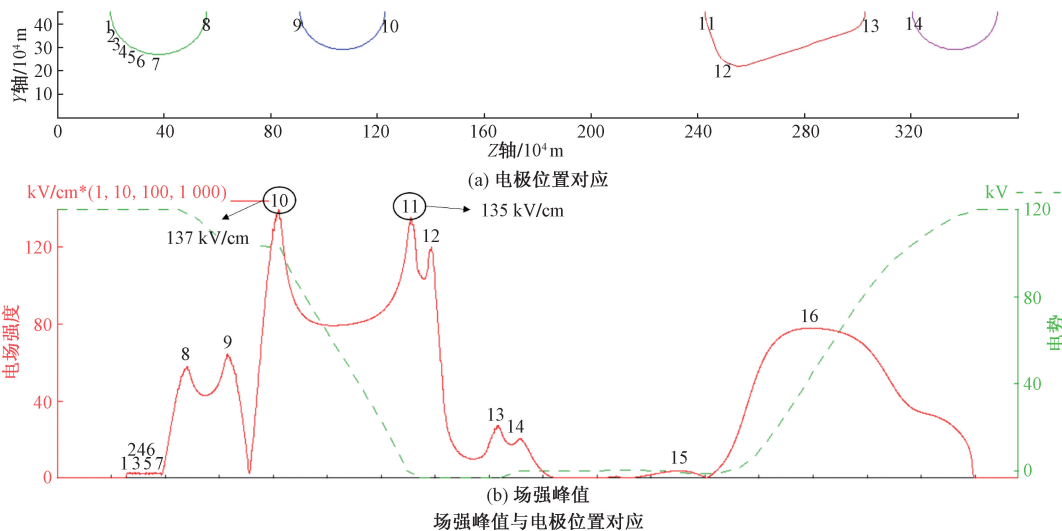


图 4 场强分布计算结果

Fig. 4 Calculated results of field strength distribution

给出了不同状态下的束流轨迹图。当引出离子电流密度较小时,束流发射面呈凹状;当等离子体参数匹配时,束流发射面趋于平面;当引出离子电流密度较大时,束流发射面呈凸状。束流发射面的形状在很大程度上决定了束散角的大小,因此在实际工程实践中不能忽视电压与等离子体参数的匹配。

为实时测量引出束的几何位置和功率密度等参数,一种热电偶被安装在水流热量计(water flow calorimeter, WFC)的背板上,如图8所示。当束流撞击在热量计背板上时,束能量将转化为热能并沿背板向四周传播,热电偶记录的不同位置和时间的数据将被反演得到束散角大小^[23]。图9给出了80 keV加速器运行在最佳导流系数时的束流剖面图,垂直方向对应的束散角为 1.3° ,水平方向为 0.65° ^[24]。红色虚线内为引出区域,可以看到功率密度从引出区中心向外减小。

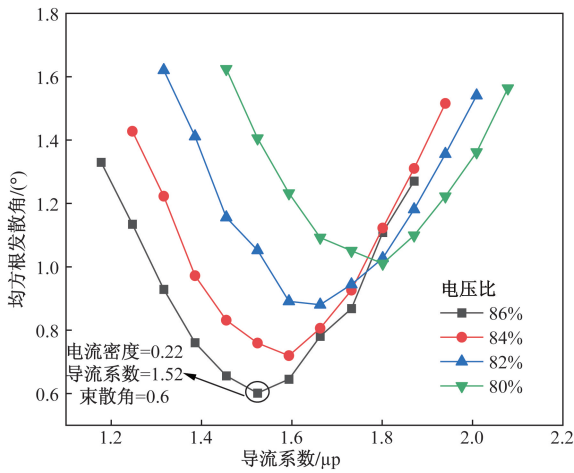
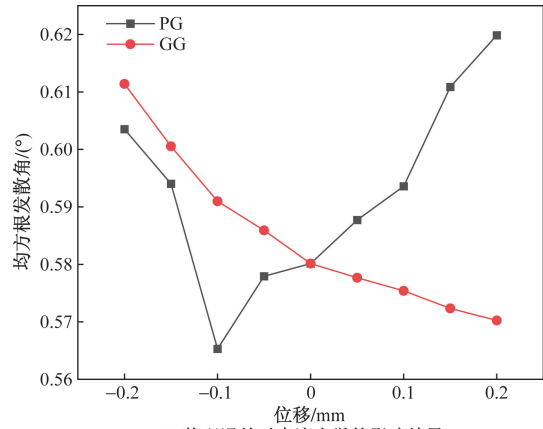


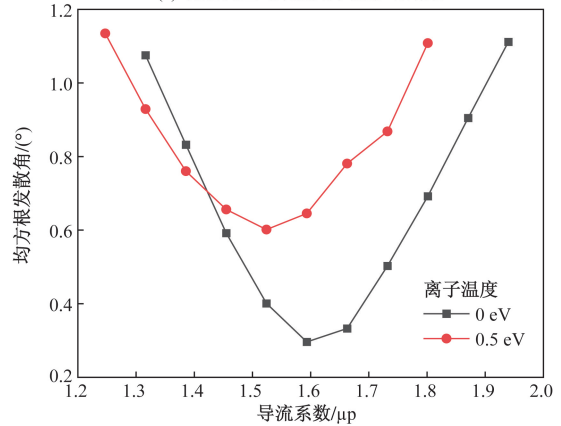
图5 不同电压比对束流光学的影响结果

Fig. 5 Results on the effect of voltage ratio on beam optics

IGUN 程序计算的垂直方向束散角为 1.2° ^[9], 实验值与模拟值吻合较好。在修改电极间隙参数的120 keV加速器样机成功装配至离子源后,将会在中性束测试台完成性能测试。



(a) 装配误差对束流光学的影响结果



(b) 离子温度对束流光学的影响结果

图6 装配误差和离子温度对束散角的影响结果

Fig. 6 Results on the effect of assembly error and ion temperature on beam optics

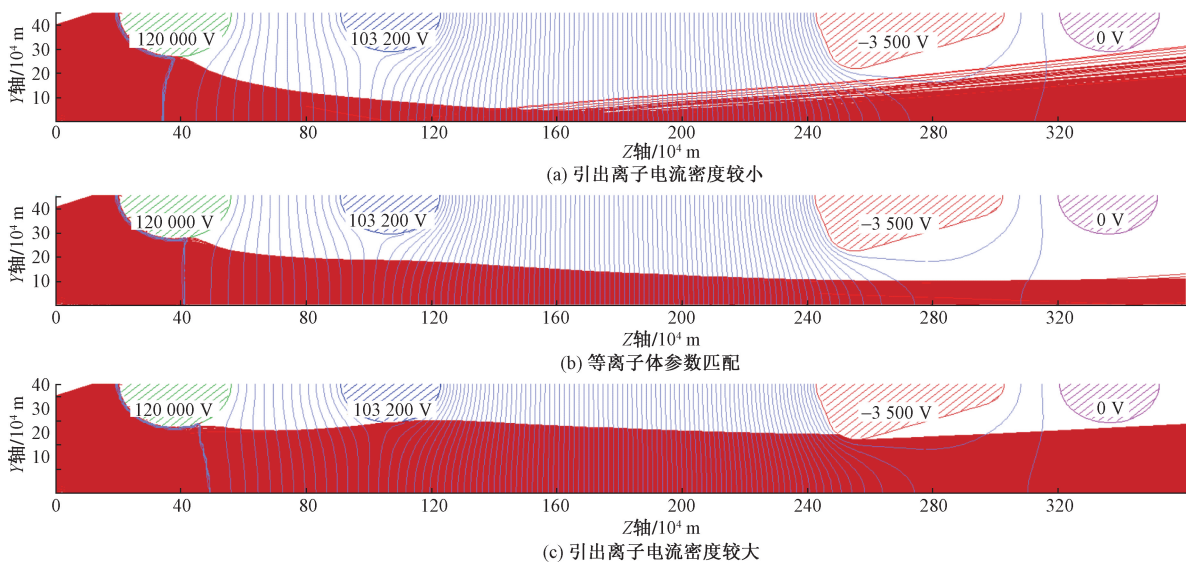


图7 不同引出离子电流密度束流轨迹图

Fig. 7 Beam trajectories at different extracted ion current density

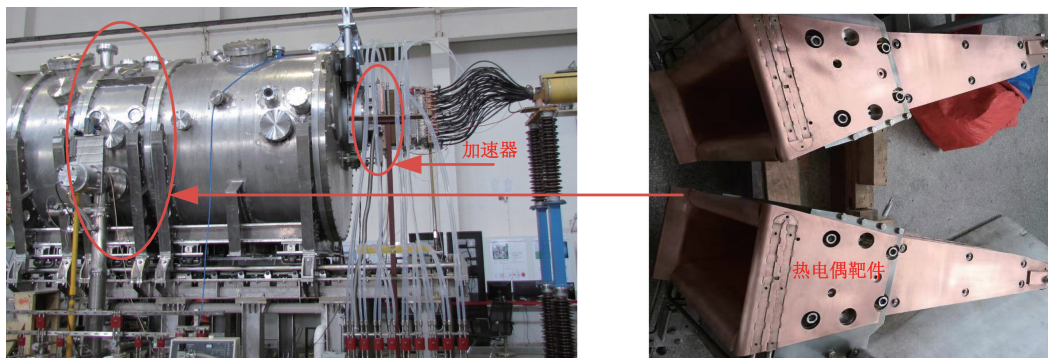
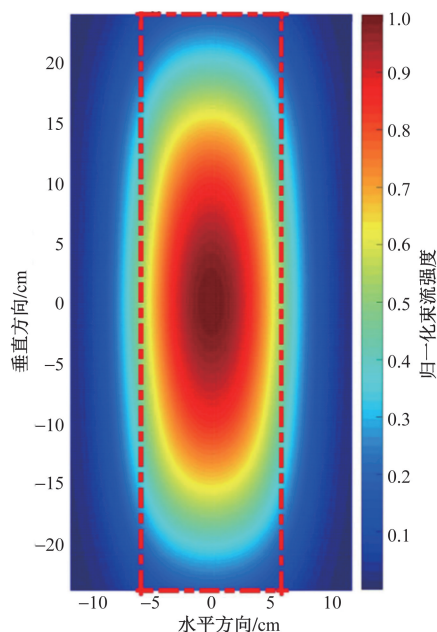


图8 中性束测试台

Fig. 8 Neutral beam test bed



红色虚线内为加速器引出区,束散角:1.3°, 0.65°

图9 水流热量计处的束流剖面图

Fig. 9 The beam profiles at the calorimeter

4 结论

研究了 120 keV 缝型四电极加速器的电极间隙和电压比对加速器束流光学的影响,同时计算了电极间场强分布和装配误差对束散角的影响。研究结果为 EAST NBI 后续工作的开展具有重要的指导意义。

(1) 第一间隙的场强大小对加速器的离子引出能力影响最大,可以通过减小第一间隙来增大离子引出能力。但当束流处于“欠聚焦”状态时,第一间隙的场强过大会加剧束流的发散。

(2) 第二间隙的场强对加速器聚焦束流的能力影响最大。要聚焦束流必须使第二间隙的场强大于第一间隙的场强。而电极的耐压性能限制了第二间隙的大小,因此需要计算场强分布来设置最小间隙。

(3) 当加速器参数确定后需要控制等离子体密度在“匹配区间(发散角 $< 1^\circ$)”内,否则等离子体发射面会过度形变从而使束流发散。

(4) 加速器电极的装配误差对束流光学的影响从上游到下游依次减小,0.2 mm 以内的装配误差对发散角的影响较小。

(5) 离子温度对束散角有一定的影响,离子温度越大束散角越大。

(6) 根据模拟结果,120 keV 缝型四电极加速器预计可获得最佳导流系数为 $1.52 \mu\text{p}$ (引出离子电流密度为 0.22 A/cm^2),最小束散角为 0.6° ,满足束流强度为 60 A 的氘离子束,在束散角小于 1° 的限制条件下,最大可实现 70 A 的氘离子束注入。

参考文献

- [1] Chapman I T, Walkden N R. An overview of shared technical challenges for magnetic and inertial fusion power plant development[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2021, 379 (2189). DOI: 10.1098/rsta.2020.0019.
- [2] Ongena J, Koch R, Wolf R, et al. Magnetic-confinement fusion [J]. Nature Physics, 2016, 12(5): 398-410.
- [3] Chen Y Q, Wu B, Li J, et al. Neutronic response of the neutral beam after EAST NBI upgraded[J]. Fusion Engineering and Design, 2023, 192. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113806.
- [4] Li J G, Wan Y X. Present state of Chinese magnetic fusion development and future plans[J]. Journal of Fusion Energy, 2018, 38 (1): 113-124.
- [5] Cirić D, Ash A D, Crowley B, et al. Performance of upgraded JET neutral beam injectors[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(6): 509-112.
- [6] Vella M C, Cooper W S, Pincosy P A, et al. Development testing of the U. S. common long pulse source at 120 kV[J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(11): 2357-2365.
- [7] 曹建勇, 魏会领, 耿少飞, 等. HL-2M 装置 NBI 加热系统规划及束线研究进展[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(S2): 489-494.
Cao Jianyong, Wei Huiling, Geng Shaofei, et al. Plan and research progress on the NBI heating system of HL-2M tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(S2): 489-494.

- [8] Xie Y H, Xie Y L, Liu S, et al. Upgrade of the neutral beam injection system on EAST[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(11): 4086-4090.
- [9] Xie Y H, Hu C D, Zhao H W. Analysis of ion beam optics of tetra-rodde accelerator for neutral beam injector on the experimental advanced superconducting Tokamak [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 791: 22-26.
- [10] 胡纯栋, 许永建. EAST 中性束注入器研制进展[J]. 核技术, 2015, 38(11): 95-98.
Hu Chungdong, Xu Yongjian. Development progresses of EAST neutral beam injector[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(11): 95-98.
- [11] 李建鹏, 李兴达, 张兴民. 电感耦合式射频离子源放电与引出特性实验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(22): 20-24.
Li Jianpeng, Li Xingda, Zhang Xingmin. Experimental study of discharge and beam current extraction for inductively coupled radio frequency ion source [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 20-24.
- [12] 李兴达, 张天平, 李建鹏, 等. 射频离子推力器束流特性数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4266-4271.
Li Xingda, Zhang Tianping, Li Jianpeng, et al. Numerical simulation of beam characteristics of RF ion thruster[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4266-4271.
- [13] Crowley B, Rauch J, Scoville J T. Modeling and experimental studies of the DIII-D neutral beam system[J]. Fusion Engineering and Design, 2015(96/97): 443-446.
- [14] Kim T S, Jeong S H, In S R. New ion source for KSTAR neutral beam injection system [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(2). DOI: 10.1063/1.3671742.
- [15] Kim T S, Jeong S H, In S R. Numerical simulation for the accelerator of the KSTAR neutral beam ion source[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(2). DOI: 10.1063/1.3267842.
- [16] 刘祖平. 束流光学[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2014.
Liu Zuping, Beam optics[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 2014.
- [17] 张华顺. 离子源和大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
Zhang Huashun. Ion source and high-power neutral beam source [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987.
- [18] Menat M, Chavet I, Kanter M. The lens effect of the extraction electrode aperture on high-intensity ion beams in electromagnetic isotope separators[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1974, 118(1): 135-140.
- [19] Kim J, Chang D H, Chang D S, et al. An ion optics study for KSTAR neutral beam injector developmenta[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2). DOI: 10.1063/1.2804879.
- [20] Becker R, Herrmannsfeldt W B. A program for the simulation of positive ion extraction including magnetic fields[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(4): 2756-2758.
- [21] Becker R. Automatic generation of IGUN(C) input files for enhanced mesh resolution at the plasma meniscus[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(2). DOI: 10.1063/1.3660822.
- [22] 余珮炫, 魏会领, 邹桂清, 等. HL-2A 装置 NBI 加热束束流光学特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(5): 91-95.
Yu Peixuan, Wei Huiling, Zou Guiqing, et al. Beam optic characteristics of neutral beam heating line on HL-2A[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(5): 91-95.
- [23] Xu Y J, Hu C D. Theoretical analysis of some problems in the measurement of beam divergence angle for EAST neutral beam injector[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 54(S2): 300-304.
- [24] Hu C D, Xu Y J, Xie Y L, et al. Thermal analysis of EAST neutral beam injectors for long-pulse beam operation[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(4). DOI: 10.1088/2058-6272/aaa4f0.